

Тараненко М. Е. /д. т. н./, Тараненко И. М. /к. т. н./  
 Национальный аэрокосмический университет  
 им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»

## Комплексная квалиметрическая оценка технологии листовой штамповки

*В статье приведены основные свойства листоштампованных деталей. Показано, что к наиболее важным относятся свойства функционального назначения, технологичности и технологической наследственности. Рассмотрены свойства технологичности деталей и подходы к формированию квалиметрических моделей частных свойств и их показателей качества технологичности. Для большинства этих показателей построены шкалы показателей или предложены подходы к построению равнозначных шкал разных показателей. Ил. 5. Табл. 1. Библиогр.: 9 назв.*

**Ключевые слова:** крупногабаритные листовые детали, штамповка, показатели качества, шкалы показателей, технологическая себестоимость, технологическая наследственность

*The main properties of sheet-metal stamping pieces are presented in the article. It is shown that to the most important ones are function and technological properties. Coded-score scales are built for most of these indexes, or approaches to building of equivalent scales of different indexes are suggested.*

**Keywords:** large sheet articles, stamping, quality parameters, coded-score scales, production cost, technological heredity

### Список обозначений

ПК – Показатель качества  
 ТН – Технологическая наследственность  
 ХАИ – Харьковский авиационный институт  
 НАКУ – Национальный аэрокосмический университет  
 $\sigma_B$  – временный предел прочности, МПа  
 $\sigma_T$  – предел текучести, МПа.

Качество продукции – основное орудие в конкурентной борьбе за рынки сбыта. Объективная оценка качества возможна методами теоретической квалиметрии. В большинстве работ «гуру качества» – ученых экономистов и менеджеров второй половины XX века и в последующих работах специалистов разных стран вопросам формирования показателей качества на этапах опытно-конструкторских работ и технологической подготовки производства не уделялось должного внимания. Но именно на этих этапах жизненного цикла формируется очень важное свойство продукции – ее технологичность при производстве, эксплуатации и утилизации. Недостаточная технологичность листовых крупногабаритных деталей обуславливает значительную часть внутренних потерь производства (упущенную прибыль) от ненадлежащего качества. Синтезу квалиметрических моделей технологичности посвящена эта работа.

### Свойства крупногабаритных листовых деталей

Из большого количества свойств, присущих расходуемой продукции, для названных дета-

лей более актуальными для квалиметрического анализа являются следующие группы свойств:

- функционального назначения;
- технологичности;
- воспринятой технологической наследственности (ТН);
- экономические.

**Показатели назначения** – одна из важнейших групп ПК, характеризующих назначение, область применения, транспортабельность, конструктивные и другие особенности изделия. Они применимы для всех видов деталей вне зависимости от цели оценки уровня качества и условий ее применения.

Функции, выполняемые крупногабаритными листовыми деталями, можно отнести к трем видам:

- функции образа некоторого объема по заданной форме (аэродинамические обшивки, параболические зеркала). К ним предъявляются высокие (очень высокие) требования по точности формы;
- функции передачи распределенных механических нагрузок (нервюры, диафрагмы). Они требуют заданной точности формы, повышенной точности размеров и минимальных значений вредных остаточных напряжений;
- функции ограничения некоторых объемов (стенки сосудов, днища, детали интерьеров транспортных средств). Для них присущи нормальные или пониженные требования по точности и нормальные требования по внешнему виду.

**Показатели технологичности конструкции изделия** – важная составная часть оценки качества изделия, поскольку в комплексе они характеризуют эффективность конструктивно-технологических решений с точки зрения приспособленности (адаптивности) изделия для изготовления на конкретном производстве с заданными условиями выпуска и минимальной себестоимостью. Они должны задаваться на этапе проектирования или при технологической проработке изделия. Их состав для детали ОМД рассмотрен далее.

**Показатели воспринятой ТН** достаточно важны для оценки качества готовых изделий, так как могут существенно влиять на функции назначения и содержание маршрута изготовления изделия в целом. Например, коробление листовых деталей затрудняет автоматизацию процесса сборки.

**Показатели технологичности листовых деталей**

Технологичность – свойство детали, конструкции, машины, дающее возможность ее изготовления на данном производстве в заданные сроки, в количестве и с указанным качеством при минимальных затратах. Естественно, на разных предприятиях и при различных условиях показатели технологичности могут отличаться. Это свойство комплексное и может быть расчленено на ряд более простых свойств (рис. 1). Технологичность – один из важных ПК. Такое определение несколько отличается от определения по ГОСТ 14.205-83, которое записано в более общей форме, но по смыслу они идентичны. В ГОСТ 14.004-74 записаны показатели техноло-

гичности (всего 35 показателей), но они оценивают уже изготовленную продукцию (например, относительные трудоемкость и себестоимость конструкции или изделия, удельная трудоемкость ремонтов и т. д.). Такой состав показателей очень громоздок и, главное, не дает возможности управлять качеством на этапе проектирования. Нами предложен другой состав показателей.

Алгоритм определения комплексного показателя технологичности начинается с оценки соответствия габаритных размеров листовой заготовки и детали технологическим возможностям оборудования ( $P_{тв}$ ). Он может принимать два значения: 1 – соответствия техническим возможностям, 0 – полное несоответствие. Последнее влечет за собой принятие соответствующих управленческих решений.

Далее приведены частные показатели технологичности по другим свойствам.

Строго говоря, некоторые из приведенных ниже показателей являются комплексными, например, показатель технологичности по точности можно разделить на ряд более частных показателей:

- точности разных размеров детали;
- точности вогнутых или выпуклых поверхностей;
- точности толщины детали;
- точности по двум координатам зон сопряжения поверхностей.

Показатель технологичности по локальным элементам может состоять из следующих показателей:

- наличия локальных элементов;



Рис. 1. Структура показателей технологичности

## ПРОКАТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

- места их расположения (борт или стенка);
- направленности выпуклости локальных элементов в направлении действия нагрузки или наоборот;
- формы локальных элементов.

Показатель технологичности по генеральной форме может содержать показатели по наличию или отсутствию окон и мест их расположения.

Эти свойства конструкции детали (при известных объемах производства) определяют выбор схемы и метода штамповки, необходимое оборудование, стоимость и сроки ТПП, а также производительность процесса формообразования. Но в первом приближении их можно не учитывать.

**Показатели технологичности по генеральной форме ( $P_{эф}$ )** детали в плане. Здесь принято предположение о том, что любую деталь можно представить как некую генеральную форму с наложенными на нее локальными элементами в виде радиусов сочленения бортов детали друг с другом и их сочленения с дном детали, различного рода рифтов, выштамповок, подсечек и прочих элементов с поперечными размерами, значительно меньшими размеров генеральной формы.

Влияние формы матричной полости в плане на сложность и трудоемкость штамповки достаточно сложно оценить какой-либо функциональной зависимостью или объективным пока-

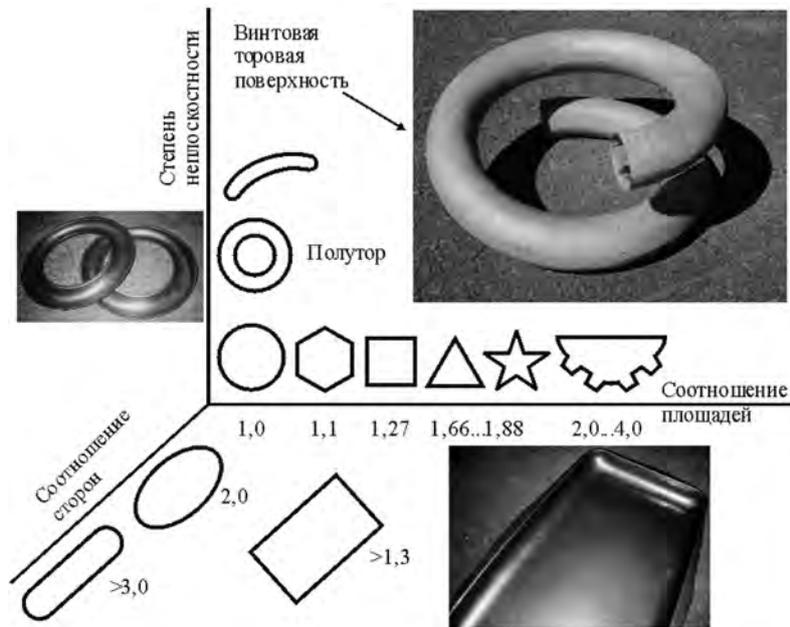
зателем. Во многом это объясняется отсутствием теоретических или эмпирических зависимостей, описывающих деформирование участков поверхностей с разнозначной кривизной, что может приводить к потере устойчивости формы заготовки или ее участков, на которых затруднено пластическое течение. Это вызывает необходимость использования экспертных оценок, которые трудно использовать при автоматизированном проектировании.

На основании опыта можно предложить следующий подход к численной оценке сложности формы [1].

Многообразие форм в плане описывается в трехкоординатном векторном пространстве, а количественное значение сложности формы оценивается в виде координат по соответствующим осям. В качестве осей выбирают (рис. 2):

- соотношение площадей фигуры и площади вписанного круга. Подобный подход (в несколько измененном виде) используется в биологии для описания форм биологических объектов, для подсчета количества древесины в лесах и других областях;
- соотношение сторон или осей фигуры (эллипс, овал, желоб);
- степень несплошности поверхности заготовки или степень неплоскостности ее поверхности.

Подобное описание формы проводится для определенных производственных систем с раз-



**Рис. 2.** Влияние формы полости в плане на сложность процесса штамповки-вытяжки листовых деталей: по горизонтальной оси формы: круглая, многоугольная, квадратная, треугольная, полость с выпукло-вогнутыми участками, полость сложной формы; по вертикальной оси – полутор, спиральный полутор; по оси изометрии – эллипсы (овалы) с разным соотношением сторон, желоба; цифрами показаны значения соотношения площадей фигуры и вписанной окружности

ной номенклатурой листоштампованных деталей. При наличии на производстве большой номенклатуры деталей типа окантовок отверстий в корпусах изделий или полуторов вдоль вертикальной оси можно располагать формы с отверстиями на заготовках, например, деталей типа окантовок отверстий. Во втором случае – при наличии деталей с генеральной формой двойной кривизны можно ввести представление о четвертой оси, вдоль которой располагаются детали с разной степенью кривизны генеральной формы, например, внутренние панели двери автомобиля. Двойная (однозначная или двухзначная) кривизна резко увеличивает трудоемкость штамповки, т. е. снижает качество формы из-за возможности потери устойчивости на начальных этапах деформирования.

Линейка расположения форм вдоль горизонтальной оси выполнена в порядке уменьшения углов фигуры: круг – многогранник – квадрат – треугольник – фигура с выпукло-вогнутыми участками – фигура сложной формы.

Такой ряд совпадает с рядом сложности формообразования фигур генеральной формы в плане. Наиболее проста штамповка, например, круглого днища по сравнению с формообразованием квадратной или треугольной фигуры. В свою очередь, круг является наиболее простой фигурой в направлении изометрической оси, на которой в порядке увеличения сложности штамповки расположены эллипс (овал) и в пределе переходящий в замкнутый по бортам желоб. Проекцией преобразования квадрата в направлении этой оси являются прямоугольники (с разным соотношением сторон). Круг является исходной фигурой для ряда форм (полуторы, спиральные полуторы и др.), штампуемых из заготовок с отверстиями. Некоторые формы отштампованных деталей показаны на рис. 2. Значения отношения площади фигуры к площади вписанного круга записаны под соответствующей формой. Под треугольной формой записан диапазон значений, определяемый разными треугольниками (прямоугольный, равно-сторонний треугольники). Для наиболее широко используемых форм деталей значения этого отношения  $K_{\phi}$  равно: шестиугольник – 1,10; квадрат – 1,27; равно-сторонний треугольник – 1,66; равнобедренный треугольник – 1,88; эллипс (с соотношением осей 2:1) – 2,0.

Использование такого отношения имеет и определенный физический смысл. Например, из теории листовой штамповки известно, что условия формообразования тупого угла значительно проще, чем острого, или неравномерная кривизна контура эллипса затрудняет течение металла на участках с ее большим значением. Полученные значения  $K_{\phi}$  позволяют установить

определенную градацию на шкале генеральной формы. ПК технологичности по генеральной форме следует считать величину, обратную  $K_{\phi}$ .

Проверить соответствие указанных значений фактической трудоемкости штамповки деталей таких форм необходимо на основании статистических данных. Для сравнения лучше выбирать параметр трудоемкости вместо себестоимости, так как он более устойчив к временным изменениям, меньше зависит от стоимости нормо-часа, которая для разных предприятий бывает различной в одно и то же время. Конечно, при приведении стоимостных затрат (стоимость энергии, металла, расходных материалов) не обойтись без значений стоимости нормо-часа. Однако использование параметра трудоемкости более точно при таких сравнениях.

Для сравнения рассмотрим ТП штамповки трех типов крупногабаритных деталей из стали 08кп толщиной 1 мм, а именно:

- круглого в плане сферообразного днища диаметром 1000 мм и глубиной 300 мм;
- квадратной коробчатой детали с габаритными размерами 1000 мм и глубиной 100 мм с плавными радиусами сопряжения бортов между собой и стенкой, равными 100 мм;
- сложного по форме полупатрубка с неплоским фланцем и генеральной формой двойной кривизны с габаритными размерами 1000×1000 мм и максимальной глубиной 100 мм.

Такие детали в мелкосерийном производстве можно изготавливать по трем вариантам ТП:

- тип А – штамповка детали на механическом прессе, снабженном гидро- или пневмоподушкой с использованием оснастки, состоящей из пуансона и матрицы;
- тип Б – изготовление на гидропрессах штамповки эластичной или жидкой средой (прессы типа QRD или ПШП);
- тип В – последовательная локальная штамповка на многоконтурных ЭГ-прессах.

Технико-экономические расчеты трудозатрат выполнялись на основе математических моделей процессов и технико-экономических данных, приведенных в работах [2-5], опытных данных Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ» (г. Харьков) и личного опыта автора.

Эти расчеты подтвердили указанное отношение между круглой и квадратной формами с вполне удовлетворительной точностью, а для деталей сложной формы в плане с точностью около 40 %. Это объяснимо некоторой неопределенностью понятия «сложной формы».

В целом сравнение количественных показателей формы и трудоемкости ее штамповки можно использовать в квалиметрических расчетах.

Показатель технологичности по глубине детали ( $P_z$ ). Этот показатель преимущественно следует использовать при оценке параметра качества крупногабаритных коробчатых деталей с плоским дном в отличие от показателя степени вытяжки.

Влияние глубины детали на затрачиваемую для штамповки энергию, а, следовательно, на показатель технологичности по фактору потребной энергии оценивается в работе [3, 6]. Там сделан вывод о том, что частный показатель технологичности по потребной энергии для основных штампуемых форм  $P_z$  увеличивается пропорционально второй степени глубины детали  $H$ . С учетом стоимости изготовления оснастки он записывается в виде следующей функции

$$P_z = f_1(H^2) + f_2(H^{2,5...4}).$$

Такая функция достаточно резко возрастает с увеличением параметра  $H$ , что позволяет сделать вывод о преобладающем влиянии фактора глубины детали на показатель ее технологичности. При этом глубина детали рассматривается относительно минимального поперечного размера детали.

Показатель технологичности по величине вытяжки или формовки ( $P_\theta$  или  $P_{форм}$ ). Показатель  $P_\theta$  в отличие от  $P_z$  используется для оценки сложности штамповки деталей с неплоским дном (днища). При вытяжке пространственная форма детали получается за счет втягивания поверхности фланца в матричную полость, сам фланец при этом утолщается. В силу ограниченности пластических свойств металла существуют ограничения по величине вытяжки фланца и, следовательно, по глубине детали. Известно много технологических приемов и специальных схем оснастки для увеличения степени вытяжки фланца.

Математически эта величина определяется для круглых в плане форм матричной полости как отношение диаметра заготовки  $D_3$  к диаметру матрицы  $D_m$

$$K_{\text{выт}} = D_3 / D_m.$$

Теоретически для большинства штампуемых материалов  $K_{\text{выт}} = 2,72$ , но практически она недостижима. При значениях  $K_{\text{выт}} = 1,42$  формируется полусфера. До этих значений процесс штамповки относительно прост, возникающие утонения материала отштамповки не превышают 20-22 %, что считается приемлемым. Складкообразование на фланце практически отсутствует. С увеличением  $K_{\text{выт}}$  более 1,5 процесс штамповки усложняется, и качество деталей ухудшается.

Таким образом,  $K_{\text{выт}}$  достаточно хорошо описывает сложность процесса и технологичность детали, а поэтому можно принять  $K_{\text{выт}} = P_\theta$ .

При формовке рассматривается сложный параметр – коэффициент формовки  $K_{фр}$ , физический смысл которого состоит в оценке возможного растяжения материала заготовки для получения пространственной формы той или иной глубины. Достаточно подробно о рекомендуемых (оптимальных) размерах рифтов и местных выштамповках написано в работах В. П. Романовского [7]. На рис. 3 приведен график рекомендуемых значений относительной глубины рифтов. Эту величину можно считать коэффициентом технологичности локальных элементов. Выход значения этого показателя за пределы указанного диапазона резко ухудшает технологичность.

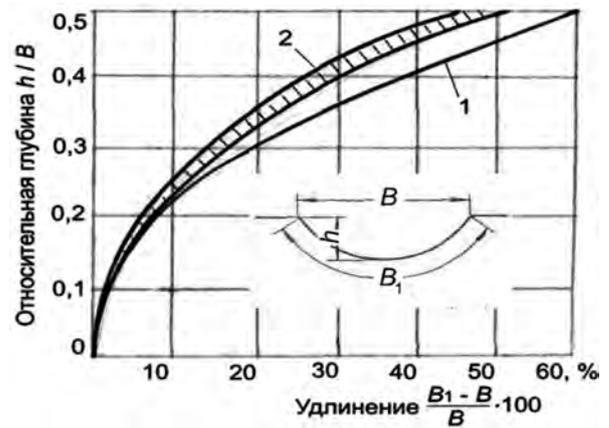


Рис. 3. Зависимость относительной глубины рифтов от удлинения материала при штамповке ребер жесткости:

1 – расчетные значения; 2 – диапазон практических значений

Превышение значений  $h/B$  приводит к разрывам материала заготовки, а уменьшение значений затрудняет формообразование из-за относительно сильного влияния упругой составляющей деформации.

Показатель технологичности, учитывающий наличие или отсутствие фланца у детали ( $P_{фл}$ ), определяется коэффициентом фланца

$$P_{фл} = D_{фл} / D_m,$$

где  $D_{фл}$  и  $D_m$  диаметр фланца и матричной полости для круглых деталей. При отсутствии фланца у детали  $P_{фл} = 1$ , а при  $P_{фл} > 1$  фланец присутствует. Значения  $P_{фл} > 1,5$  усложняет процесс штамповки, а деталь является менее технологичной. По этому свойству  $K_{фл} = P_{фл}$ .

Показатели технологичности по радиусу скругления бортов и ботов с дном ( $P_{угл}$ ) можно определить с помощью коэффициента мест-

ной вытяжки  $m_{мест}$ . Местный коэффициент вытяжки – это коэффициент вытяжки условного полого цилиндра, вписанного в зону сочленения бортов между собой и сочленением их с дном. Он рассчитывается из условия равенства площадей условного цилиндра и необходимой заготовки.

Влияние величин радиусов сопряжения бортов между собой и стенок с бортами на соответствующий частный показатель технологичности предлагается оценивать по сложности и количеству необходимых технологических приемов, используемых при штамповке коробчатых деталей [6].

Количественным показателем сложности формообразования трехгранного угла в этом случае служит местный коэффициент вытяжки.

**ПК технологичности по месту расположения локальных элементов ( $P_{пл}$ )**

Место расположения локальных элементов существенно влияет на показатели технологичности. Например, их нахождение на бортах детали или в зонах максимальных деформаций утонения требует применения дополнительной оснастки и переходов.

К настоящему времени не найден обобщающий количественный показатель этого параметра.

**Показатель технологичности по точности формы ( $P_{точ}$ )**

Требования точности листоштампованных деталей определяются их функциональным назначением и устанавливаются конструктором. Общеизвестных нормативов точности таких деталей не установлено. Для относительно узкой номенклатуры листовых деталей, а именно, днищ, в работе [8] установлено четыре категории точности: I – особо точные; II – повышенной точности; III – нормальной точности; IV – пониженной точности.

Современная радиотехника требует днищ (зеркала антенн космической связи) еще более высокой точности. Например, отклонения контура сечения (любого по окружности) параболических антенн не должно превышать 5-10 длин волны электромагнитного сигнала, а это при частоте такого сигнала порядка 10-20 ГГц составляет несколько десятых долей миллиметра.

Если для изготовления днища пониженной точности можно использовать в качестве матрицы только вытяжное кольцо, то для штамповки днищ повышенной точности требуется несколько переходов и несколько комплектов оснастки повышенной точности [6]. По данным НАКУ «ХАИ», показатель  $P_{точ}$  сильно зависит от категории точности днищ. Эта зависимость показана на рис. 4.

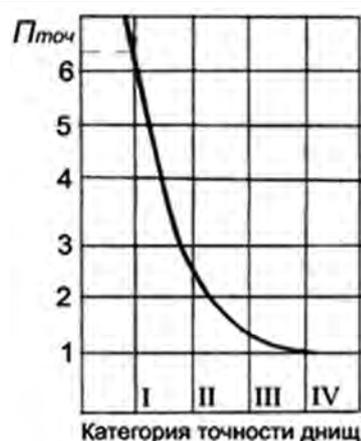


Рис. 4. Зависимость показателя технологичности по точности листовых днищ

Зависимость построена по данным трудоемкости процесса штамповки и стоимости изготовления оснастки в процессах импульсной штамповки. За единицу показателя  $P_{точ}$  принят показатель технологичности пониженной точности. Показатель технологичности по точности детали достаточно весом, так он зависит от схемы штамповки и количества необходимой оснастки.

**Показатель технологичности по толщине стенки детали ( $P_{тол}$ )**

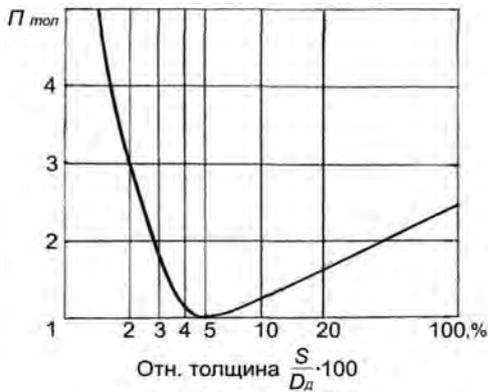
Окончательная толщина заготовки детали, т. е. отношение толщины  $S$  к максимальному габаритному размеру детали  $D_d$  определяет схему штамповки, точность применяемой оснастки, требует достаточной жесткости прижимных элементов и отсутствия возможных перекосов.

В практике листовой штамповки днищ [8] они классифицируются по пяти группам:

- особо тонкостенные  $S/D_d \cdot 100 < 0,15$ ;
- тонкостенные  $S/D_d \cdot 100 = 1,5 \dots 0,15$ ;
- среднестенные  $S/D_d \cdot 100 = 5,0 \dots 1,5$ ;
- толстостенные  $S/D_d \cdot 100 = 50 \dots 5,0$ ;
- особо толстостенные  $S/D_d \cdot 100 > 10,0$ .

Наиболее сложна штамповка особо тонкостенных деталей, так как при их формообразовании велика возможность потери устойчивой формы. Она выражается в возникновении гофр, складок, выпучин и вмятин, которые сложно устранить при калибровке. Деформирование таких деталей нужно вести таким образом, чтобы в заготовке возникали и поддерживались только растягивающие напряжения. При этом возникает опасность появления больших утонений и, как следствие, разрывов заготовки. С другой стороны, при штамповке толстолистовых и особо толстостенных деталей необходима тяжелая и прочная штамповая оснастка. Часто она выполняется составной из нескольких элементов. Это усложняет и удорожает процесс штамповки и приводит к снижению технологично-

сти детали. Ориентировочная зависимость  $P_{тол}$  от относительной толщины заготовки показана на рис. 5. Более или менее приемлемый диапазон показателя технологичности по толщине находится в диапазоне относительных толщин 1,0...5,0.



**Рис. 5. Зависимость показателя технологичности по точности от толщины заготовки**

**Показатель технологичности по КИМ ( $P_{ким}$ )**

Влияние КИМ на технологичность рассматривается по экономическим соображениям. Чем он выше, тем выше технологичность по соображениям затрат на изготовление. Показатель КИМ как отношение массы (или площади детали) к массе (или площади) заготовки, всегда меньше 1. В современном листостамповочном производстве КИМ находится в диапазоне 0,20-0,95.

**Показатель технологичности по стоимости и срокам ТПП ( $P_{тпп}$ )**

Этот показатель также в большой мере характеризует экономическую составляющую технологичности. Для анализа технологичности чаще всего используют относительные или удельные показатели, которые рассчитываются как отношение фактических сроков и затрат к аналогичным показателям ранее производимой подобной продукции или к массе детали. Диапазон его значений достаточно широк.

**Показатель технологичности по применяемому материалу ( $P_m$ )**

На основании теории деформации этот параметр можно оценить отношением предела прочности к пределу текучести или к условному пределу пропорциональности  $\sigma_B / \sigma_T$  или  $\sigma_B / \sigma_{0,2}$ . Условия штамповки улучшаются при повышении значений такого отношения, при невысоких значениях  $\sigma_B$  (но это противоречит соображениям прочности конструкции) и высоких значениях пластичности материала.

Новые сплавы, разработанные для листовой штамповки, штампуются достаточно хорошо. Значение соотношения  $\sigma_B / \sigma_{0,2}$  у них превышает 1,5 (за исключением HSLA 50 и BH 250), но

они обладают повышенным деформационным упрочнением и склонны к увеличенному короблению, что связывается с высоким и неравномерным полем остаточных напряжений. Более того, для их деформирования требуется оборудование с более высокой энергооборуженностью по сравнению с существующими прессами. Новые сплавы обладают еще рядом положительных свойств и начинают широко использоваться в производстве автомобильных кузовов. Из традиционных углеродистых сплавов хорошей штампуемостью обладают 08кп, 30ХГСА, у которых отношение  $\sigma_B / \sigma_{0,2}$  превышает 1,60. Из алюминиевых сплавов хорошей штампуемостью обладают сплавы АА 5182 ( $\sigma_B / \sigma_{0,2} = 2,23$ ), АМг6М ( $\sigma_B / \sigma_{0,2} = 2,00$ ), АМцАМ ( $\sigma_B / \sigma_{0,2} = 2,36$ ). Исходя из приведенного краткого обзора, можно сделать вывод о том, что показателем технологичности можно считать отношение  $\sigma_B / \sigma_{0,2}$  и учетом абсолютных значений временного предела прочности.

Перечень показателей технологичности достаточно большой. При решении конкретных задач квалиметрического анализа этот перечень сокращается до 3-5, реже 7 показателей, определяемых как наиболее важные с учетом здравого смысла в конкретной ситуации и рекомендаций теоретической квалиметрии.

В результате проведенного анализа установлена возможность количественного учета ряда факторов, влияющих на квалиметрический показатель технологичности.

Комплексный показатель технологичности рассчитывается по зависимости

$$P_{техн}^k = P_{тпб} \left( 1 - \sum_{i=1}^n P_i \right), \quad \sum_{i=1}^n P_i < 1,0,$$

где  $P_i$  – относительное значение ПК  $i$ -того свойства;  $n$  – количество учитываемых свойств.

**Показатели воспринятой технологической наследственности**

**Технологическая наследственность** – часть информации, переданная заготовке и воспринятая деталью в ходе технологического преобразования. Она может быть информацией назначения процесса, полезной или вредной. Эта информация формирует некоторые свойства детали. В приложении к ОМД факторы, влияющие на ТН, представлены в таблице.

В таблице не приведен еще один фактор, характерный для листовой штамповки – локализация деформаций по толщине листа (утонение) в определенных местах детали. Ее степень зависит от применяемого вида штамповки и используемых технологических приемов, материала детали и ее формы. При квалиметрическом ана-

Основное назначение процесса и факторы, влияющие на технологическую наследственность [8]

Способ обработки	Геометрическая форма	Макро- и микрорельеф	Структура фазового состава	Химический состав	Наклеп	Остаточные напряжения	Несплошность	Включения
Холодное деформирование	Н	Н	+		+ -	+ -		
Штамповка листа, гибка	Н	-			+ -	+ -		

Примечание. «+» – факторы, влияющие положительно; «-» – факторы, влияющие отрицательно.

лизе названный фактор можно рассматривать как фактор технологичности формы.

Фактор наличия поля остаточных напряжений при листовой штамповке крупногабаритных деталей проявляется в возникающих пружинении, короблении и деформации детали. Влияние основных параметров детали на величину пружинения можно рассматривать на примере прямолинейной гибки [9]. Угол пружинения  $\Delta\alpha$  определяется по зависимости:

$$\Delta\alpha = \frac{1}{E} \left( 3\sigma_{ТО} + \Pi \frac{2s}{2r+s} \right) \left( 1 + \frac{r}{s} \right) \alpha,$$

где  $\sigma_{ТО}$  – экстраполированный предел текучести;  $\Pi$  – модуль упрочнения при линейном законе упрочнения;  $s$  – толщина листа;  $r$  – радиус гiba (радиус оснастки);  $\alpha$  – угол гiba.

Из формулы видно, что величина вредной ТН – угол пружинения (неповторение формы оснастки) увеличивается с ростом отношения  $\sigma_{ТО} / E$ , интенсивности упрочнения  $\Pi$  (оба параметра – это характеристики материала), относительного радиуса  $r/s$  и угла  $\alpha$ , на который изгибается заготовка (параметры детали).

Анализ такой зависимости с учетом степенного закона упрочнения, учетом изгиба стенки детали моментом (а не силой), учетом непрямолинейности бортов и ряда других факторов приводит к очень сложным зависимостям, т. е. помимо выше перечисленных факторов, на величину остаточных напряжений влияет интенсивность неравномерности нагружения.

Отсюда следует два важных вывода.

1. При штамповке сильно упрочняющихся материалов следует ожидать больших пружинений и поводов деталей.

2. Для снижения этих нежелательных явлений необходимо выбирать такую последовательность деформирования, при которой поле напряжений (или деформаций утонения) было бы более равномерным вдоль поверхности детали. Пример получения особо высокоточных днищ за два перехода приведен в работе [6].

Фактор наклепа поверхности детали наиболее часто проявляется при соударении с высокой скоростью перемещающейся заготовки с поверхностью матрицы. Это наблюдается при импульсной калибровке взрывом. Интенсивное соударение в редких случаях приводит к повышению точности формы детали, но появляющийся наклеп поверхности является нежелательным явлением.

Степень проявления ТН оценивается коэффициентом ТН –  $K_{нас}$ . Для разных форм ее проявления  $K_{нас}$  выбирают равным отношению уровня остаточных напряжений в точке к модулю упругости материала или степени неприлегания детали к поверхности матрицы. Для оценивания последнего используется простейшая шкала «плохо-удовлетворительно-хорошо».

### Выводы

В результате квалиметрического анализа конструкции листовых деталей и применяемых технологий удалось разложить сложное свойство технологичности конструкции детали на ряд более простых свойств. Для этих свойств записаны зависимости качества этих свойств от параметров, которыми можно управлять при проектировании конструкции (выбирать качественную конструкцию).

### Библиографический список

1. Квалиметрия в обработке листовых деталей давлением / М. Е. Тараненко, О. Н. Клименко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії». – Харків, НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (2014). – С. 164-170.
2. Математические модели для массовой оценки рыночной стоимости кузнечно-прессовых машин / А. П. Ковалев, Е. В. Курова // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2003. – № 8. – С. 34-41.
3. Разработка математической модели расчета квалиметрических показателей аппаратов / М. Е. Та-

раненко, А. В. Демченко, А. В. Маковецкий // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных технологичности крупногабаритных листовых деталей: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского. – 2009. – Вып. 1 (57). – С. 79-83.

4. Авиадвигателестроение. Качество, сертификация и лицензирование: учеб. пособие / В. Ф. Безъязычный, А. Ю. Замятин, В. Ю. Замятин и др.; под общ. ред. В. Ф. Безъязычного. – М.: Машиностроение, 2003. – 840 с.

5. Качество и сертификация промышленной продукции: учебн. пособие / А. Г. Гребеников, А. К. Мялица, В. М. Рябченко и др. – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 1998. – 396 с.

6. Тараненко М. Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы: монография в 2 ч. / М. Е. Тараненко. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиацион. ин-т». 2011. – 273 с.

7. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. – Л.: Машиностроение, 1971. – 782 с.

8. Мельников Э. Л. Холодная штамповка днищ. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.

9. Технология и автоматизация листовой штамповки: учебн. для вузов / Е. А. Попов, В. Г. Ковалев, И. Н. Шубин. – М.: изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 480 с.

Поступила 23.05.2015



УДК 621.735.32+621.73.042

Наука

**Белевитин В. А. /д. т. н./**  
ОАО «Уфалейский завод металлоизделий»  
**Смирнов Е. Н. /д. т. н./**  
Донецкий национальный технический университет

**Коваленко С. Ю., Суворов А. В.**  
Челябинский государственный педагогический университет

## Моделирование влияния макростроения кузнечных слитков на потенциальные возможности получения высококачественных поковок

*Представлены результаты моделирования методом конечных элементов потенциальных возможностей расширения диапазона технологических процессов производства поковок за счет интенсификации сдвиговых деформаций в объеме подвергаемых свободной ковке на прессах кузнечных слитков с трехлепестковой конфигурацией его поперечного сечения. Показано влияние использования при моделировании гипотез изотропности и структурной неоднородности на интенсивность преобразования дендритной крупнозернистой структуры в мелкозернистую при использовании плоских и комбинированных бойков. Ил. 6. Библиогр.: 8 назв.*

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, сдвиговые деформации, производство поковок, макростроение кузнечного слитка, гипотезы моделирования

*The results of range expanding potential possibilities of technological process of forgings manufacturing by using shear deformations intensification in the volume of forging ingots with a trilobal cross-section configuration which are subjected by free forging and performed by FEM modeling are presented. The influence of hypothesis of isotropy and structural heterogeneity used during modeling influence on the transformation intensity of dendritic structure from coarse into fine-grained structure by using flat and combined striver has shown.*

**Keywords:** shear deformations, FEM modeling, forgings manufacturing, forging ingots macrostructure, hypothesis of modeling

### Постановка проблемы

Увеличение выхода годного металла и, как следствие, повышение экономичности способов производства готовой продукции – одна из наиболее важных составляющих частей проблемы ресурсосбережения, металлоемкости наци-

онального продукта. При этом к качеству готовой продукции предъявляются все более высокие требования.

Применительно к процессу получения высококачественных поковок с заданной макроструктурой и требуемым уровнем распределе-